森林火灾发生时空分布及变化研究

邵亚奎[1]　　冯仲科[1,2]　　孙林豪[1]　　马天天[1]　　杨煊涵[1]

[1]（北京林业大学精准林业北京市重点实验室 北京 100083）

[2]（海南大学林学院　　海口 570228）

摘要： 基于近 20 年森林火灾数据，研究中国森林火灾影响因素及时空变化，与气象、地形地势和社会人文数据等多源数据进行数据挖掘与定量分析，通过趋势检验、核密度分析、标准差椭圆和重心转移等方法，分析了 2001-2019 年中国森林火灾的变化趋势。结果表明 2001-2019 年来中国森林火灾总体上呈现波动下降趋势，2001-2014 年呈现上升趋势，2015-2019 年呈现下降趋势。中国森林火点多分布在海拔 200-500m、坡度 5-15°、坡向南坡东南坡、温度 10-15°、平均湿度 60-70%、降水量小于 5mm、距道路距离 500-1500m、距居民点距离 4000-7000m 等范围内。中国森林火灾大多数发生在中国的西南地区、华南地区、东北地区、华东地区，2001-2019 年全国森林火灾发生在南北方向呈间接收缩趋势，在东西方向较为稳定。

关键词： 森林火灾，多源数据，影响因素，时空变化，

分类号： TP379

Study on temporal and spatial distribution and variation of forest fires

Yakui Shao[1]　Zhongke Feng[1,2] Linhao Sun [1] Tiantian Ma [1] Xuanhan Yang [1]

[1](Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

[2] (College of Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Based on the forest fire data of the past 20 years, this paper studies the influencing factors and temporal and spatial changes of forest fires in China, and conducts data mining and quantitative analysis with multi-source data such as meteorological, topographic, and social and cultural data. Through trend test, kernel density analysis, standard deviation ellipse and barycentric shift, this paper analyzes the changing trend of forest fires in China from 2001 to 2019. The results showed that forest fires in China showed a decreasing trend from 2001 to 2019, an increasing trend from 2001 to 2014, and a decreasing trend from 2015 to 2019. Forest fire points in China are mostly distributed in the range of 200-500m elevation, 5-15° slope, south-southeast slope, 10-15° temperature, 60-70% average humidity, less than 5mm precipitation, 500-1500m distance from roads, and 4000-7000m distance from settlements. Most forest fires in China occur in southwest China, South China, Northeast China and East China. From 2001 to 2019, the incidence of forest fires in the country showed an indirect shrinking trend in the north-south direction, and was relatively stable in the east-west direction.

Keywords: Forest fires, Multi-source data, Influencing factors, Spatio-temporal variation

森林具有维护全球生态平衡，防风固沙，美化环境、固碳释氧、提供林产品与休闲旅游服务等功能 [1]。然而近年来世界各地的森林生态系统逐渐受到森林火灾的威胁，给全球生态系统和人类社会造成了巨大损失[2]。

在中国这个环境和社会经济、森林资源分布差异大的国家，自然和人为因素之间的相互作用及其对森林火灾发生风险的影响，一直是森林火灾风险防控、森林资源管理、生态保护方面的一个持久挑战[3]。理解森林火灾的发生特征及其驱动关键因素对林业生态与管理、、预测预报林火发生防灾减灾具有重要意义。

本研究围绕我国森林火灾影响因素及时空变化这一研究目标，基于近 20 年森林火灾数据，基于林火观测数据与气象、地形地势和社会人文数据等多源数据进行数据挖掘与定量分析，通过趋势检验、核密度分析、标准差椭圆和重心转移等方法，分析了 2001-2019 年中国森林火灾的变化趋势、时空分布格局以及演变趋势，充分挖掘潜在的本质特征和知识，为林火预测、防治提供有力的支持。

1　研究区和数据源

1.1 研究区概况

我国森林大多数分布在国土东北部和南部以及东南部、西南部，西北地区数量少、覆盖率低。我国东北地区的森林面积虽然较大，但相比南方地区而言，森林覆盖率低于南方地区。总体来说，我国森林资源总量低、地区分布不均、质量低、龄组结构不合理，林地产出质量不高、森林年度生长量，相比国外林业发达国家，中国仍是一个缺林少绿、生态相对脆弱的国家[4]。气候分布的地域性和复杂性显著，跨热带、亚热带、温带、寒温带等多个气候带，具有复杂多样的气候类型和显著的南北差异。东部、南部沿海地区人口密度相对较高，而西部地区人口密度较低。同时，我国人口主要分布在东部、南部、中部等区域，而西北、东北等地区人口分布相对较为分散，呈现出“胡焕庸线”式的人口空间分布不均衡现象[5]。

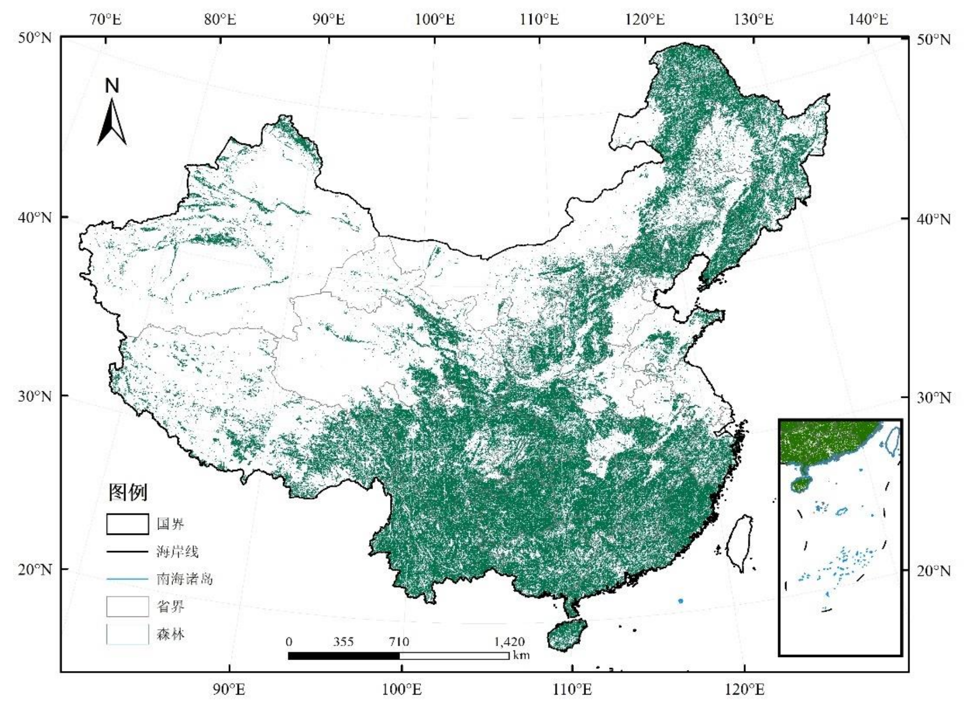


图 1 研究区森林资源分布（港澳台无数据）

1.2 数据源

本研究主要使用火点数据、气象数据、社会经济数据等（如表 1），具有如下：美国国家航空航天局（NASA）火灾信息资源管理系统（https://earthdata.nasa.gov）提供的中分辨率成像光谱仪（MODIS）活跃火矢量产品用于记录 2001-2019 年期间的火灾像素的空间分布；从国家气象信息中心获取了（http://data.cma.cn）中国地面气候数据（V3.0）每日数据集, 其中包括 2001-2019 年中国近 20 年国家气象站的每日数据。对获取到的原始数据进行预处理，通过检查数据的范围、值的类型、逻辑关系等，去除异常值和错误值；人口、GDP 数据来源于中科院资源环境数据中心（https://www.resdc.cn/）,道路、居民点数据集来源于全国地理信息资源目录系统网站（http://www.webmap.cn）。

表 1 主要数据列表

数据分类	数据来源	分辨率
火点数据	https://earthdata.nasa.gov	1 km
历史气象数据	国家气象中心 http://data.cma.cn	-
植被数据	https://www.resdc.cn	1 km
土地利用数据	https://www.resdc.cn	1 km
地形数据	https://www.resdc.cn	1 km
历史人口、经济数据	https://www.resdc.cn	1 km

2 研究方法和结果

2.1 中国森林火灾时空分布

2.1.1 月度和日分布规律

中国森林火灾的月度和日变化情况如下，结果显示：在月度分布上森林火点数量最多的月份为 3 月、2 月和 4 月，共占总数的 45.13%。其次为 1 月（10711 个）和 12 月（9659 个），这两个月占总数的 21.09%。8 月（993 个）和 7 月（721 个）是森林火点较少的月份，合计仅占总数的 1.77%。从图 3.3 所示的日变化趋势中，结果显示森林火灾在每年的第 1 天到第 41 天和第 71 天到 101 天之间呈波动上升趋势。从 101 天到 131 天和 151 天到 181 天之间呈波动下降趋势。一年中超过 127 个森林火点数量的天数超过 300 个，占总数的 67.07%。在单日森林火灾数量方面，第 43 天、第 62 天、第 94 天和第 63 天火点最多，近 20 年数量累积 507 5 个。相反，第 202 天、第 201 天、第 189 天和第 195 天火点最少，数量共计 61 个。

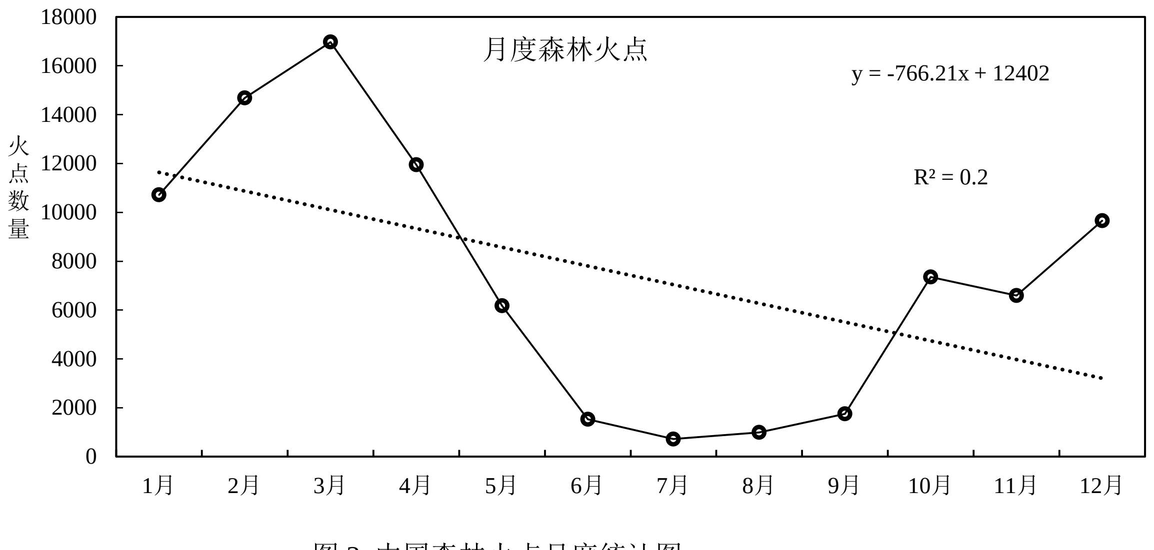


图 2 中国森林火点月度统计图



图 3 中国森林火点日分布图

2.1.2 不同生态地理分区中国森林火灾分布规律

按照气候类型划分将中国分为以下 8 个生态地理分区（如图 4），绘制了中国不同生态地理分区及其火点占比统计图，统计结果显示：中国的不同生态地理分区之间存在着明显的森林火灾分布差异，亚热带常绿阔叶林区、热带季风雨林区、寒温带针叶林区域森林火点最多，分别占总体的 71.64%、9%、8.71%，这可能与这些地区的气候条件、森林植被和人类活动等因素有关。而青藏高原高寒植被和温带荒漠区域的森林火点最少，分别仅占总体的 0.06%和 0.04%，这可能与这些地区的气候条件和植被类型等因素有关。

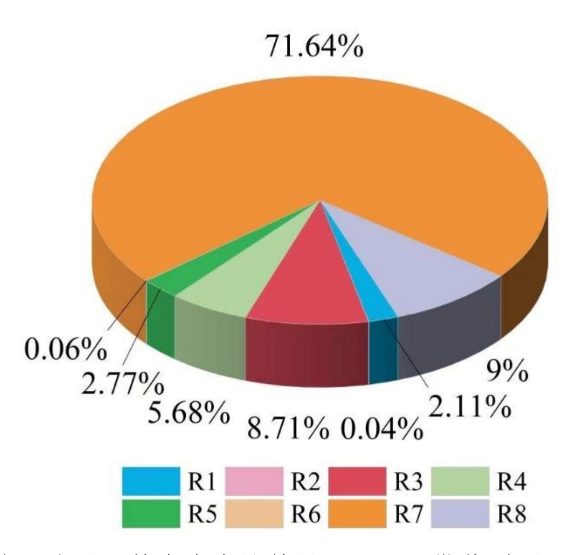


图 4 中国不同生态地理分区及其火点占比统计（R1：温带草原区 R2：温带荒漠区 R3：寒温带针叶林带；R4：温带针落叶阔叶混交林；R5：暖温带落叶阔叶林区；R6：青藏高原高山植被带；R7：亚热带常绿阔叶林带；R8：热带季风雨林、雨林区）

2.1.3 不同省份中国森林火灾分布规律

中国不同省份森林火灾分布情况如下（图 5），结果显示：中国森林火灾分布地区差异较大，云南省、广东省、广西壮族自治区、黑龙江省、江西省、湖南省、福建省分布较多，占全国的 17.07%、16.77%、11.17%、11.13%、9.44%、8.86%、6.89%。这些省份集中在南方，如云南省、广西地形复杂，森林植被类型多样，人为用火较多，广东、福建等气温相对高且农事用火较多。黑龙江省位于我国东北地区，森林资源丰富，夏季雷击火较多，是我国森林火灾最为频发的地区之一。

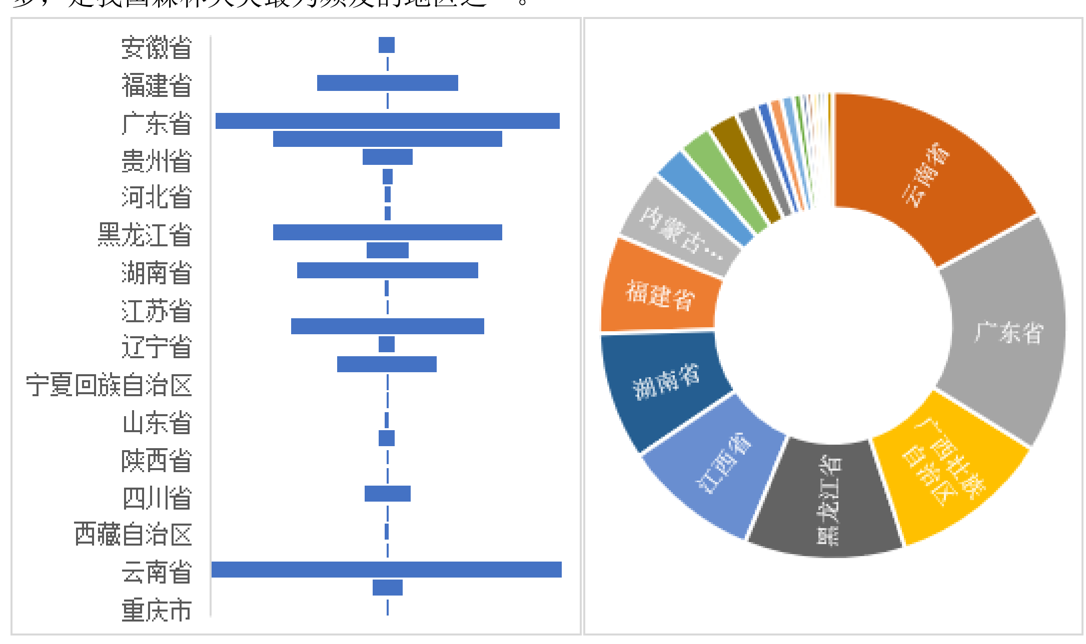


图 5 中国不同省份森林火点分布（不包括港澳台）

2.1.4 不同海拔下的中国森林火灾分布

不同海拔特征下的中国森林火灾分布情况如下，结果显示：火点数量最高的海拔范围为 200-500m，占比达到 39.71%。其次是小于 1000-3500m、200m、500-1000m 的范围，占比分别为 20.93%、19.91%、18.64%。相比之下，海拔高于 3500m 的地区火点数量很少，仅占总数的 0.81%，基本上没有火情发生。

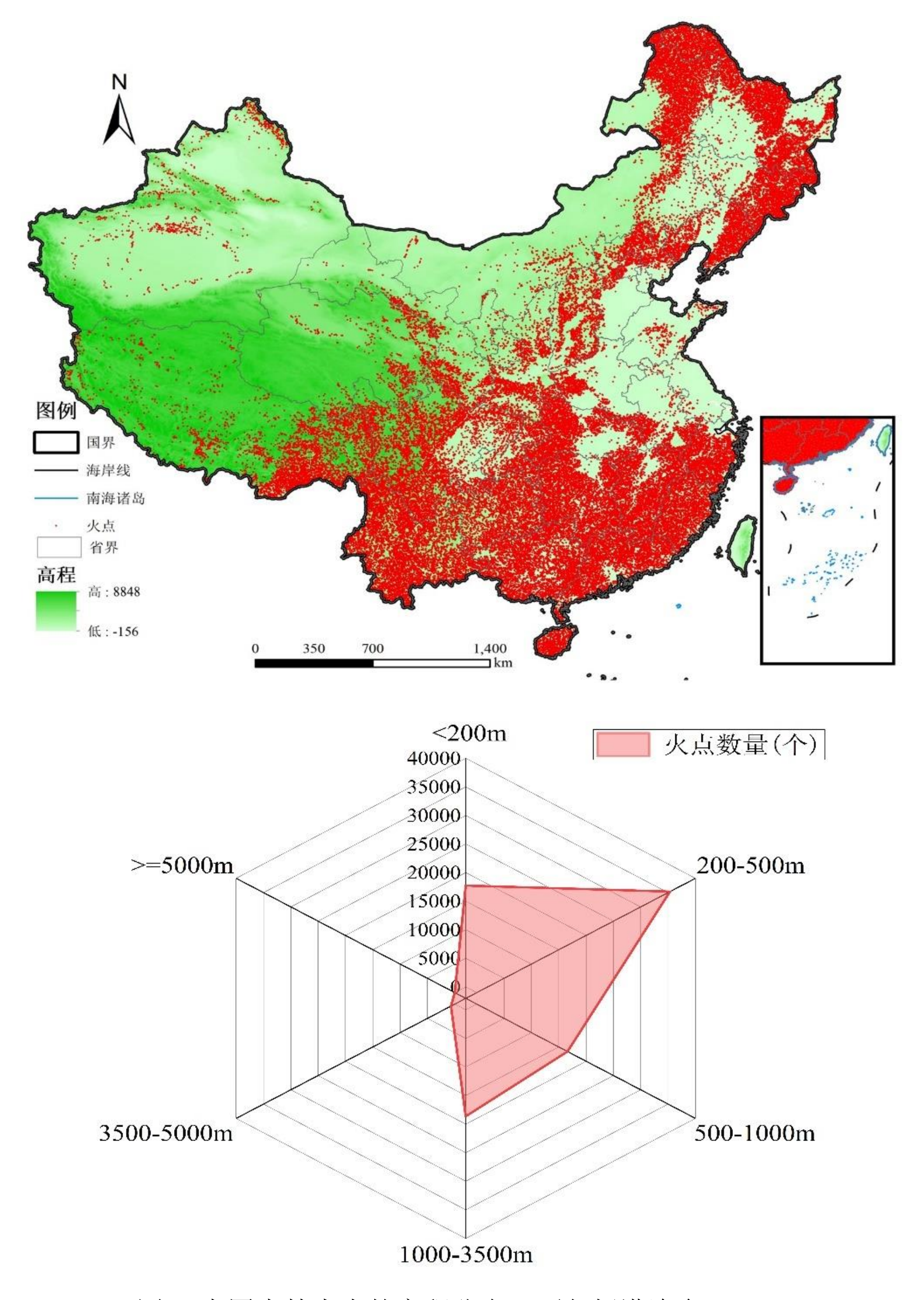


图 6 中国森林火点的高程分布（不包括港澳台）

2.1.5 不同坡度下的中国森林火灾分布

不同坡度特征下的中国森林火灾分布情况如下（图 7），结果显示：森林火点分布在 5-15°范围内最高，占比 42.18%。其次是在小于 5°、15-25°，占比分别是 26.86%、24.01%，火点分布最少的在坡度大于 35°、45°以上，只占总数的 0.84%，基本没有火情发生。一般来说坡度影响森林火灾的传播和蔓延，坡度也影响降水的时滞，进而影响可燃物的湿度。在坡度较陡的地区，通常具有更干燥的气候和更多的可燃物，更容易发生森林火灾，并且难以控制和扑灭。

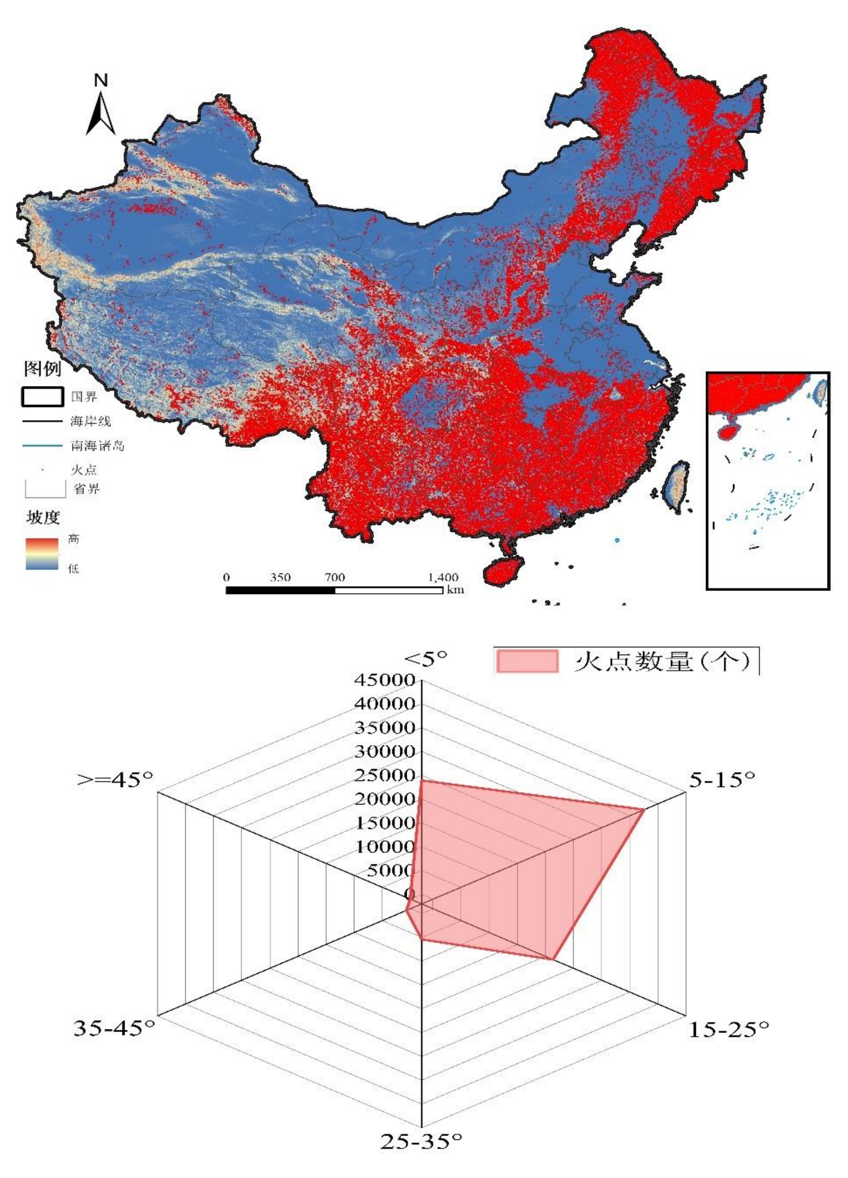


图 7 中国森林火点的坡度分布（不包括港澳台）

2.1.6 不同坡向下的中国森林火灾分布

中国森林火灾在不同坡向特征下的分布情况如下（图 8），结果显示：南坡、东南坡和西南坡的森林火点数量最多，分别占总数的 15.27%、14.52%和 12.67%。其次是东北坡和西北坡，分别占总数的 11.82%和 11.21%。北坡的森林火灾点数量最少，仅占总数 5.89%。以上结果表明坡向对森林火灾的分布有明显的影响，坡向的不同可能导致降水、气温、光照等环境因素的变化，进而影响植被生长和干燥程度，从而影响森林火灾的发生和扩散[6]。

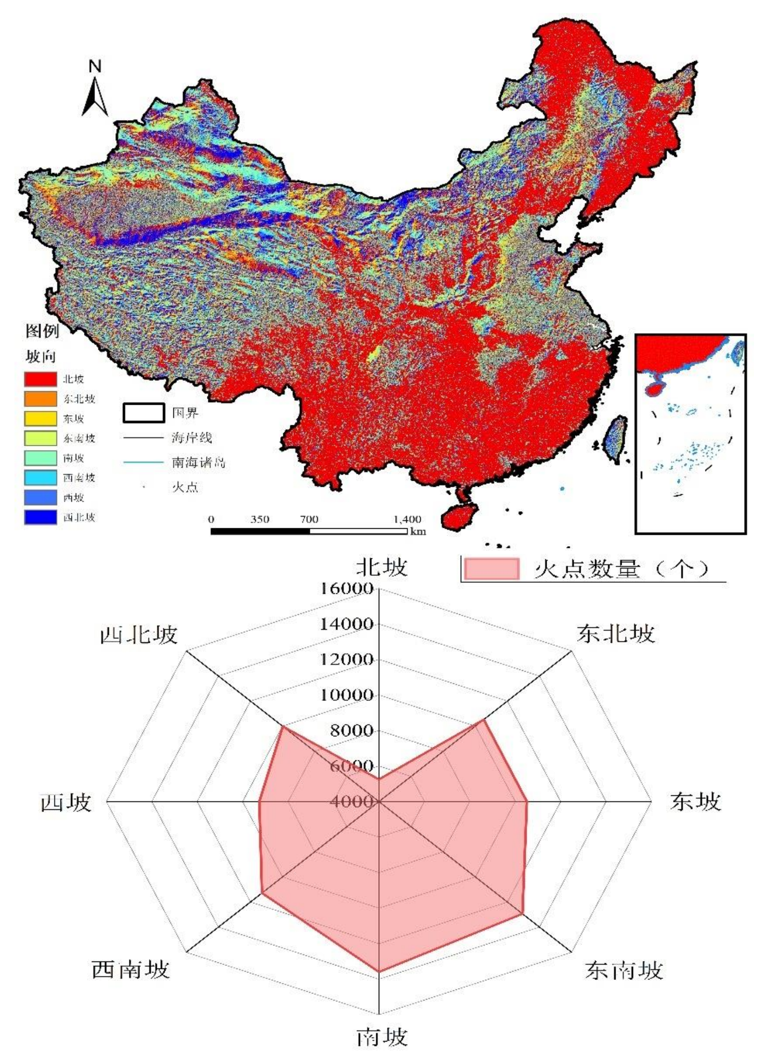


图 8 中国森林火点的坡向分布（不包括港澳台）

2.1.7 不同温度下的中国森林火灾分布

中国森林火灾在不同气温下的分布情况如下（图 9），结果显示：森林火点在平均气温 15-25°、10-15°最多，分别占 37.55%、20.45%。与此相比，在平均气温低于 0°或高于 25°，森林火点数量逐渐减少，出现递减的趋势。温度升高，湿度降低，可燃物含水量减少。高温和干燥的条件会增加森林火灾发生的风险，但是由于我国夏季高温多雨，植被含水量高，所以图中气温高（主要集中在夏季），森林火灾次数少。

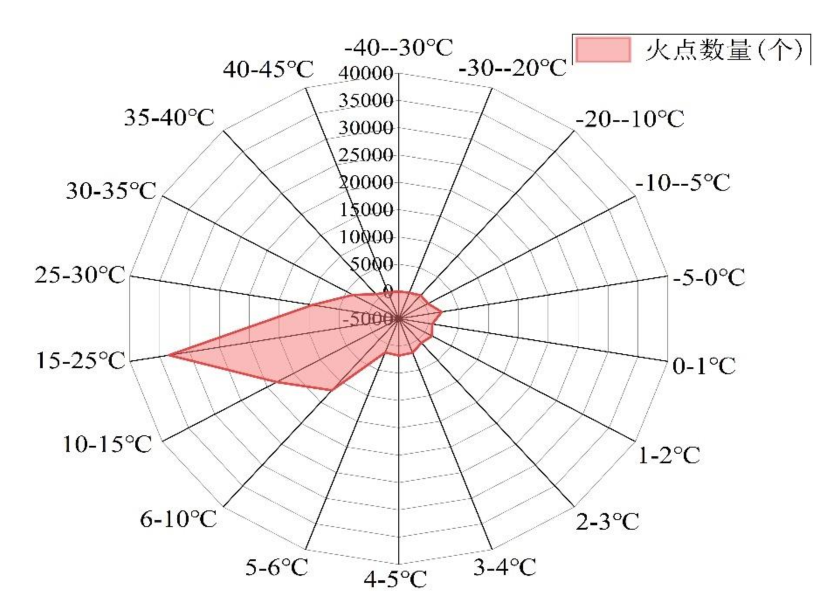


图 9 不同气温下的森林火点分布

2.1.8 不同降水量和不同风速下的中国森林火灾分布

中国森林火灾在不同降水量下的分布情况如下（图 10），结果显示：中国森林火灾在降水量小于 5mm 的情况下最为频繁，占总体的 80%。而在降水量为 5-10mm、10-15mm 等区间内，森林火灾点的数量相对较少。降水量影响可燃物的含水量，降水量过少会导致森林植被干枯，从而促进森林火灾的规模扩大。

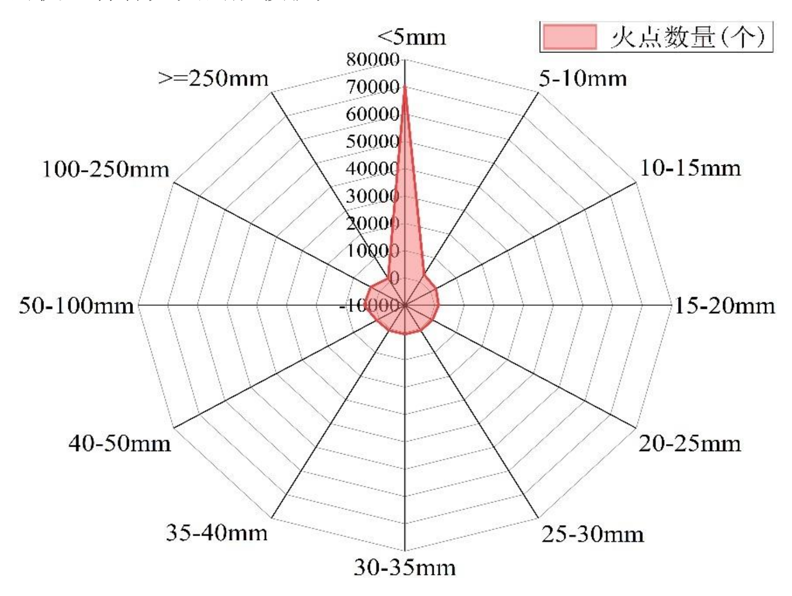


图 10 不同降水量下的森林火点分布

中国森林火灾在不同风速下的分布情况如下（图 11），结果显示：森林火点在平均风速 1-2 m/s 和 2-3 m/s 占比最高，分别为 43.87%和 19.9%。在风速 0-2m/s 范围内，随着风速的增加，森林火灾发生次数增多。然而，当风速超过 7m/s 时，森林火灾发生的概率基本为零，基本无火情发生。平均风速是森林火灾发生的重要因素之一，风速的增加加速火势蔓延和森林火灾扩散，使得控制森林火灾变得更加困难。

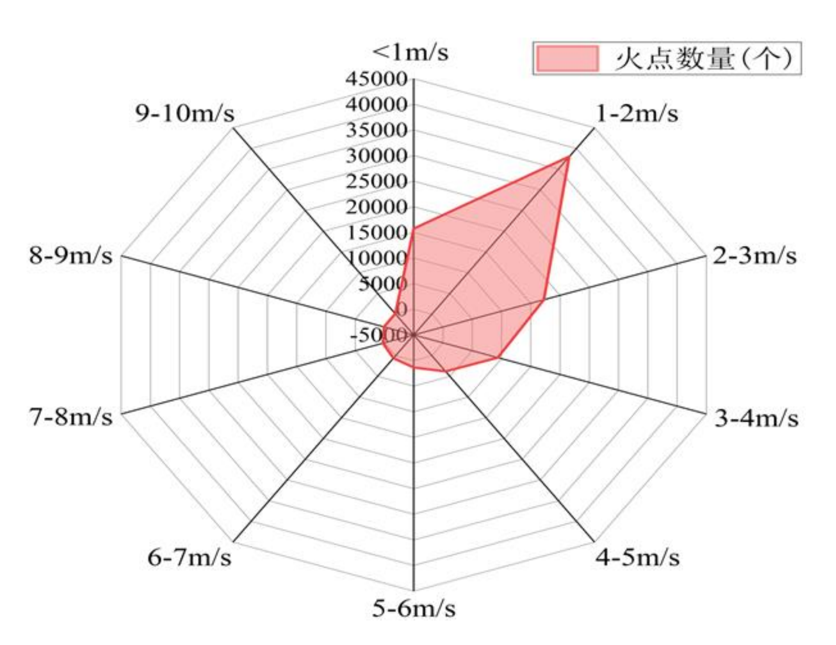


图 11 不同平均风速下的森林火点分布

2.1.9 不同社会人文下的中国森林火灾分布

中国森林火灾在不同距道路距离下的分布情况如下，结果显示：森林火点集中分布在距道路距离小于 500m、500-1000m、1000-1500m，分别占总数的 9.28%、11.84%、11.91%。在距道路距离 2000-2500m、2500-3000m 次之，占比分别为 9.02%、7.52%。在距离道路 5000m 以外，森林火点数量呈现快速下降的趋势。道路的存在是发生火灾重要因素，道路对火灾的点火有显著影响，人在道路附近野炊、道路附近扔烟头、祭祀、烧香等都可能成为引发森林火灾的火源。在旅游景点或人口稠密地区，人类活动引起的火源导致森林火灾发生。

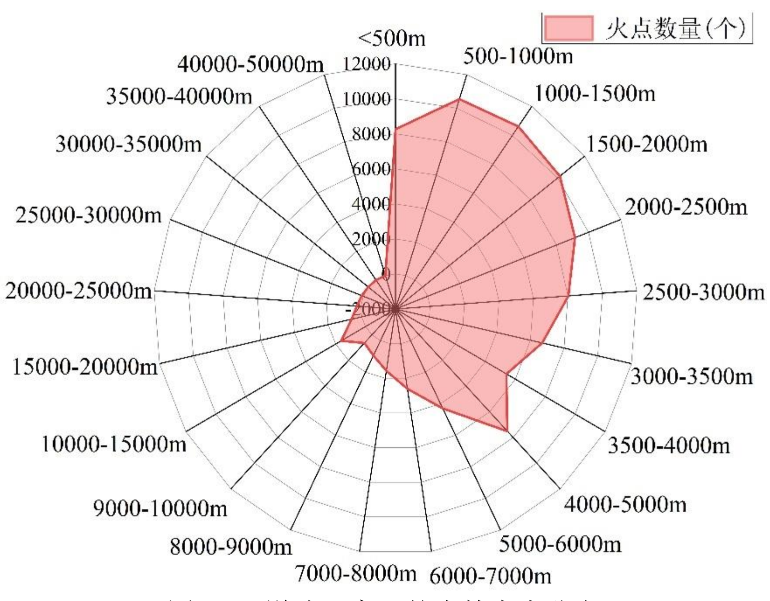


图 12 距道路距离下的森林火点分布

中国森林火灾在距居民点距离下的分布情况如下，结果显示：森林火灾数量集中分布在距离居民点 4000-7000m 的范围内，占总体的 41.5%。此外在距离居民点 0-5000m 范围内，森林火点数量呈现上升趋势。森林火灾与居民点的距离是一个重要的因素，它对火灾的扩散速度、火势大小以及对居民安全的威胁程度有显著影响。此外，通常居民点周围的环境通常较为复杂，这也会增加扑灭火灾的难度。

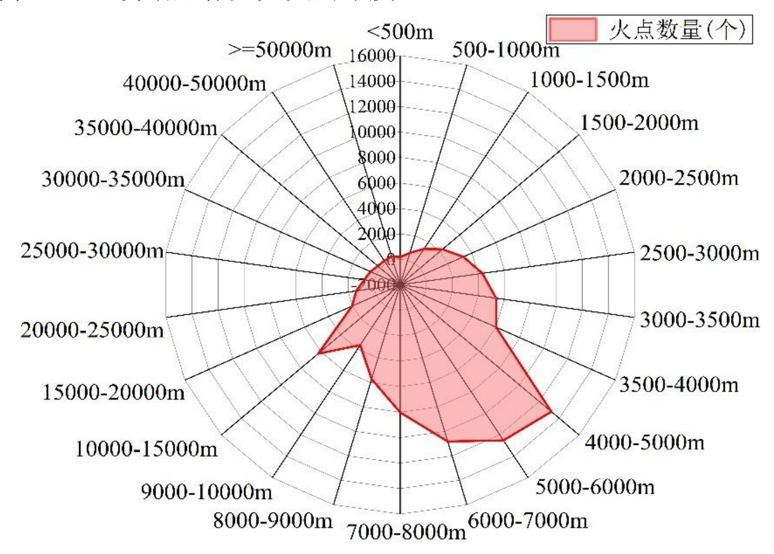


图 13 距居民点距离下的森林火点分布

中国森林火灾在特殊节日下的分布情况如下，结果显示：特殊节日总共 4444 个火点，其中清明节最多，有 2749 个火点。正月十五、正月初二、正月初一、除夕次之，中元节最少。这是由于中国特殊的传统风俗决定的（包括祭祀用火、节假日庆祝等）。例如，春节期间，由于烟花爆竹的使用，通常会增大森林火灾的发生概率。而在清明节期间，由于祭扫活动和焚烧纸钱的行为，也容易引起森林火灾的发生，通常这些活动在自然环境中进行，一旦发生火灾，很难控制和扑灭。

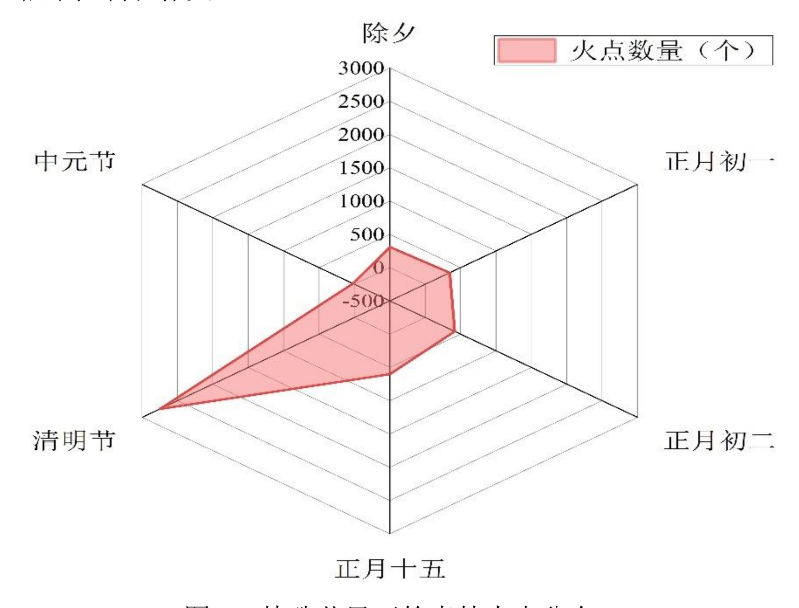


图 14 特殊节日下的森林火点分布

2.2 趋势检验

Mann-Kendall 突变检验是一种适用于时间序列数据分析检验的方法，它对于数据中的异常值和离群值具有较强的鲁棒性，并具有操作简单、适用性广泛、精度高、人为影响小、定量化程度高等优点[7]。

计算所得序列d_k是一个随机秩序列，服从正态的变量计算$UF(d_k)$[12]：

$$UF(d_k)=\frac{[d_k-E(d_k)]}{\sqrt{Var(d_k)}} \quad (1)$$

UF或UB值大于 0、小于 0，分别表示时间序列呈上升、下降趋势，超过临界显著性水平线表示存在显著的变化，且这种变化的时间范围可以被确定为突变时间区域。

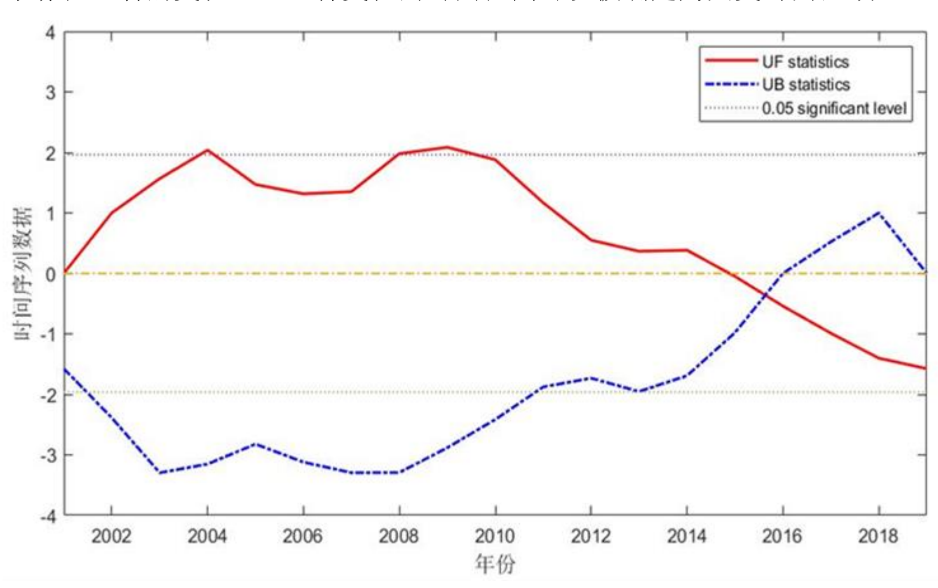


图 15　M-K 突变检验曲线

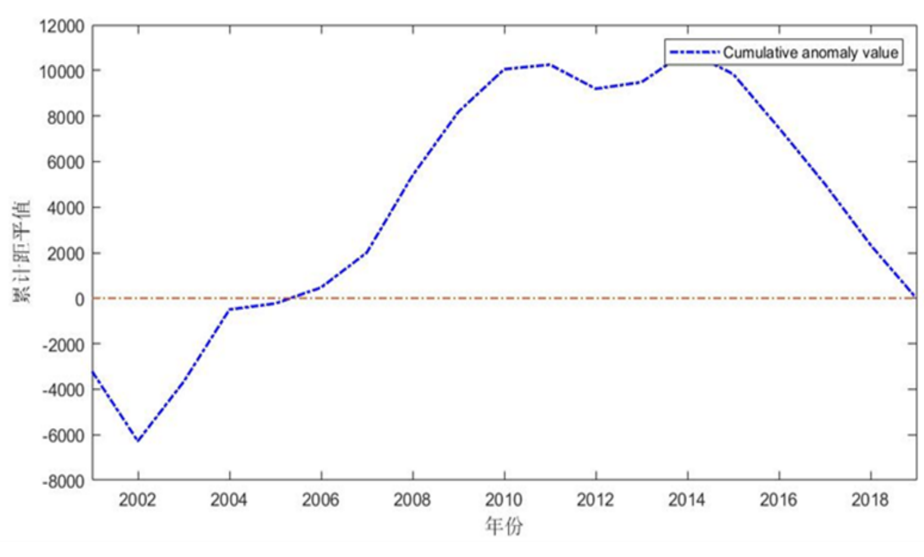


图 16 累积距平曲线

如图 15、图 16，2001-2014 年 UF 值大于 0，表明热点数量呈现上升趋势，2015-2019 年UF值小于 0，表明热点数量呈现下降趋势，UF 曲线分别在 2004 年、2008 年、2009 年超过 0.05 的信度线（+1.96），说明热点数量在这三年中上升趋势显著。UF和UB的交点在 2015 年，且在置信度线内，结合累积距平曲线可以确定 2015 年是全国森林火灾数量在近 20 年发

生突变的时间点。

2.3 核密度分析

点模式分析是空间分析领域中最常用到的方法，用于研究空间中点的分布规律、空间关系及其演化趋势，相比样方密度法、基于V图的密度法，核密度法在点密度计算方法效果最好[8]。

核密度分析是一种基于密度的分析算法，用以揭示数据的空间分布特征，其公式如下[8]：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\pi r^2}\Phi\left(\frac{d_{ix}}{r}\right) \quad （2）$$

式中： r为搜索半径，n为火点样本总数，d_{ix}为火点i与x间的距离，Φ为距离权重。

如图 17 展示了中国森林火灾的核密度分析图，结果显示：中国森林火灾密度高的区域主要分布在云南省、广西壮族自治区、广东省（河源市、韶关市、惠州市等）、福建省（南平市、三明市）、湖南省（永州市、郴州市等）、江西省（吉安市、抚州市）、黑龙江省（大兴安岭地区、黑河市），内蒙古呼伦贝尔市部分区域。这与森林火点分布的结果趋向一致。

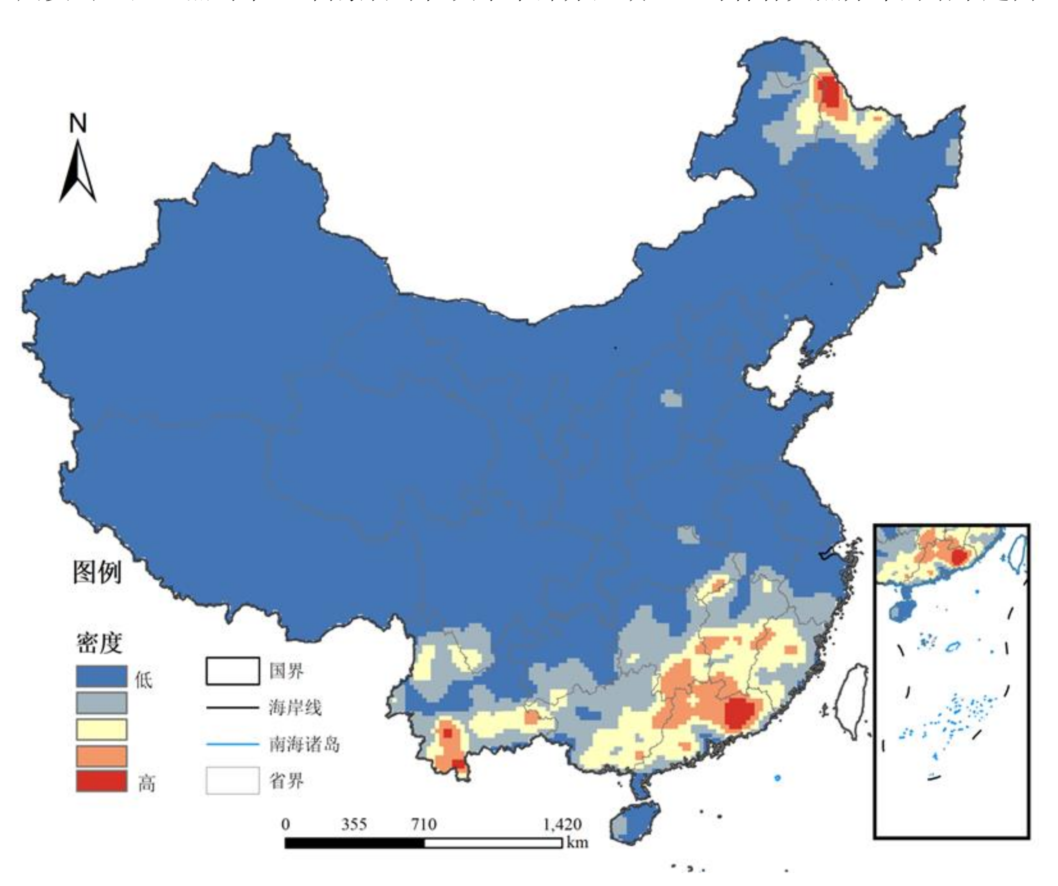


图 17 森林火灾核密度分析图（不包括港澳台）

2.4 标准差椭圆与重心转移

标准差椭圆（Standard Deviational Ellipse, SDE）是空间统计方法中能够精确地揭示空间数据的集中程度和分散程度[9]，标准差椭圆的中心即森林火灾发生的重心。识别中心的位

置变化与移动方向计算公式如下[10-12]：

$$C=\begin{bmatrix}var(x) & cov(x,y)\\ cov(y,x) & var(y)\end{bmatrix}=\frac{1}{n}\begin{pmatrix}\sum_{i=1}^{n} X_i^2 & \sum_{i=1}^{n} X_iY_i\\ \sum_{i=1}^{n} Y_iX_i & \sum_{i=1}^{n} Y_i^2\end{pmatrix} \quad (3)$$

式中：x、y是变量i的坐标；(X,Y)表示变量平均中心；n为变量总数。

标准差椭圆长轴方向反映森林火灾发生主要趋势方向，长短轴表现地理要素的分布范围，椭圆分布的 x 轴长度和 y 轴长度公式如下[11] [12]：

$$SDEx=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-X)^2}{n}},SDEy=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-Y)^2}{n}} \quad (4)$$

X and Y分别代表森林火点的经度纬度坐标，X_i and Y_i分别代表网格火点经纬度坐标。长、短轴的比值为扁率，扁率越大，表明森林火灾发生空间分布越集聚。

方向角表示森林火灾分布方向，计算公式如下[11] [12]：

$$\tan\theta=\frac{A+B}{C} \quad (5)$$

$$A=\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}\tilde{y}_i^2 \quad (6)$$

$$B=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}\tilde{y}_i^2\right)+\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i\tilde{y}_i\right)^2} \quad (7)$$

$$C=2\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i\tilde{y}_i \quad (8)$$

2001-2019 年中国森林火点的标准差椭圆及重心转移结果如表 2 及图 18，结果表明 2001-2019 森林火灾发生方位角长期在 20°-30°范围内波动，虽然 2012 年方位角增加到 40.75°，但由于 2012 年标准差椭圆扁率相较于其他年份较小，因此并不能说明森林火灾发生有向东北、西南偏移的趋势，而只能说明林火发生范围减少，有向南方集中的趋势。短半轴主要在 600-700km 范围内波动，2001-2019 年林火发生标准差椭圆长半轴整体上呈现缩短趋势，而在 2001-2002 年、2002-2003 年和 2008-2009 年间有小幅度扩张。2005-2006 年、2009-2010 年以及 2014-2015 年扩张幅度较大。根据短半轴和长半轴的变化，可以发现 2001-2019 年全国森林火灾发生在南北方向呈间接收缩趋势，在东西方向较为稳定。2001-2019 年森林火灾发生扁率总体变化趋势是先下降后上升，2001-2003 年和 2016-2019 年有东西方向上小幅扩张。2003-2016 年扁率呈总体缩小的趋势，表明林火发生区域逐渐集中， 2003-2016 年森林火灾发生区域在南北方向收缩，即森林火灾发生在南北方向影响程度逐渐减少。

从 2001-2019 年标准差椭圆分布范围和轨迹变化可以看出，森林火灾发生方向主要呈东北一西南走向。2003-2016 年森林火灾发生范围逐渐向南部地区移动，2016 年之后林火发生范围有明显向东北扩张的趋势。从重心移动的空间分布方向来看， 2001-2019 年森林火灾发生重心主要向西南方向移动有向东北移动的趋势。具体来说：2001-2003 年重心向东北方向移动 268.2km，表示东北部林火发生率明显增大。2003-2005 年向西南方向移动 1027.5km，说明 2005 年森林火灾在西南地区较 2003 年有显著的扩大。2005-2008 年林火重心先向东北方向移动 500.6km，之后向西南方向移动 470.8km，最终在 2007-2008 年向东北方向 189.8km。2008-2012 年森林火灾重心均向东西方向移动，2008-2010 年先向西移动 435.2km，2010-2011 年向东移动 483.8km，2011-2012 向西移动 545.2km。2012-2013 年重心向东北方向移动 218.9km。2013-2017 年主要在南北方向上移动，除 2014 年向南移动以外，其他年份重心均向北移动。2017-2018 年重心向西南移动 228.8km，2018-2019 年重心向西移动 108.4km。

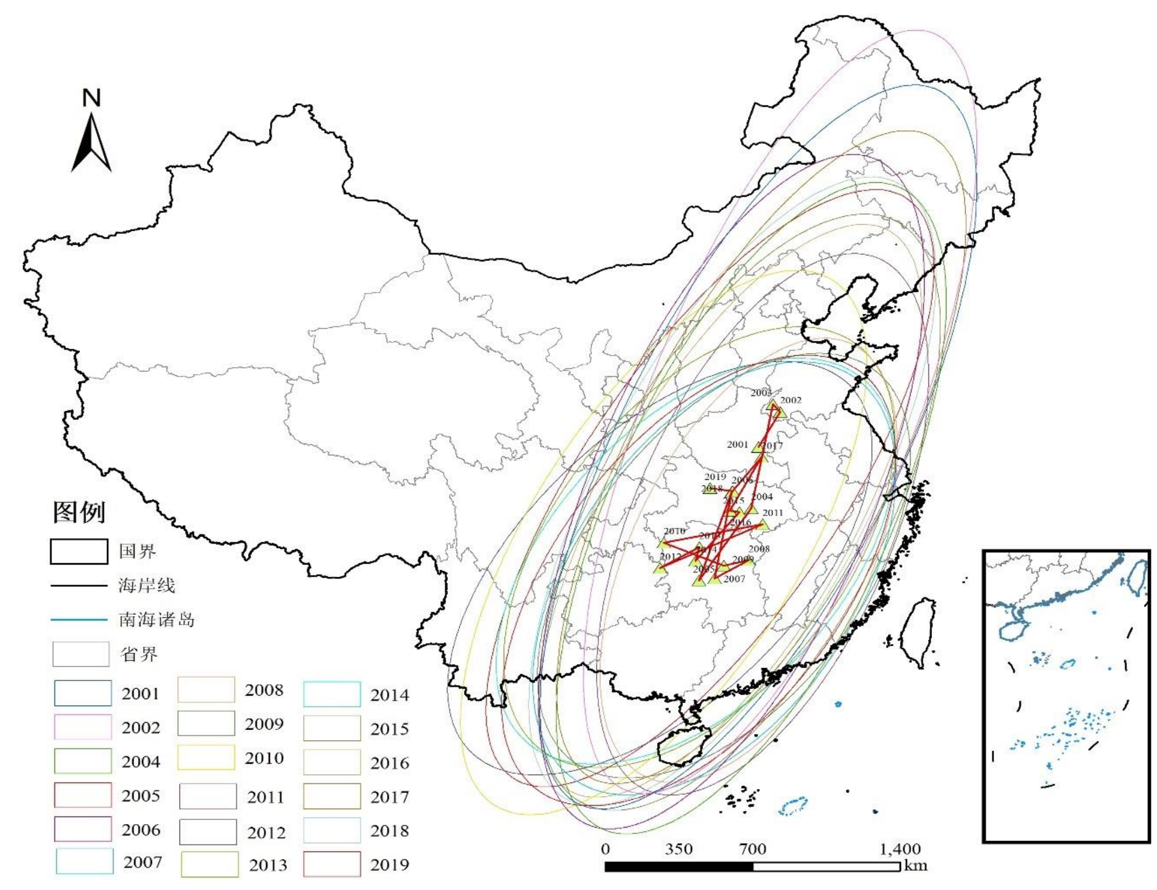


图 18 2001-2019 年森林火灾重心转移图（不包括港澳台）

表 2 中国森林火灾标准差椭圆

年份	XStdDist（km）	YStdDist（km）	Rotation（°）	Oblateness
2001	672.93	2097.59	23.76	3.12
2002	640.46	2158.34	19.57	3.37
2003	626.66	2223.95	20.51	3.55
2004	672.31	1860.90	21.90	2.77
2005	698.16	1362.69	32.77	1.95
2006	677.43	1911.73	20.51	2.82
2007	694.77	1271.51	29.27	1.83
2008	575.57	1260.86	21.86	2.19
2009	680.47	1274.87	32.28	1.87
2010	656.88	1623.37	28.82	2.47
2011	627.31	1529.86	20.42	2.44
2012	681.87	1338.28	40.75	1.96
2013	714.60	1324.79	32.65	1.85
2014	703.22	1263.71	37.84	1.80
2015	692.18	1730.98	24.86	2.50
2016	599.02	1684.80	26.23	2.81
2017	631.28	1903.06	24.67	3.01
2018	653.42	1832.19	24.98	2.80
2019	634.52	1817.65	30.47	2.86

3 结论

为探索中国森林火灾发生影响因素及其时空分布特征，基于 2001-2019 年 MODIS 监测火点数据，分析森林火灾与其影响因子之间的内在联系，综合地形、 气候、植被、社会人文因素等多种森林火灾致灾因子，对中国林火发生进行定性和定量地分析，通过空间分析技术（标准差椭圆、核密度等）对中国森林火灾时空分布及演变进行研究与分析，实现中国森林火灾发生风险时空演变进行评估与量化，揭示中国森林火灾活动的时空模式和格局特征，结果表明：

（1）2001-2019 年来中国森林火灾总体上呈现波动下降趋势，从趋势检验结果看，2001-2014 年呈现上升趋势，2015-2019 年呈现下降趋势。

（2）中国森林火点多分布在海拔 200-500m、坡度 5-15°、坡向南坡东南坡、温度 10-15°、降水量小于 5mm、距道路距离 500-1500m、距居民点距离 4000-7000m 等范围内。

（3）中国森林火灾大多数发生在中国的西南地区、华南地区、东北地区、华东地区，云南省、广东省、广西壮族自治区、黑龙江省、福建省等分布较多，集中分布在亚热带常绿阔叶林区、热带季风雨林区、寒温带针叶林区域、温带针叶落叶阔叶林区。2001-2019 年全国森林火灾发生在南北方向呈间接收缩趋势，在东西方向较为稳定。

参考文献:

[1] 邵亚奎,王蕾,朱长明,方晖,张新,黄端,陶莉.GEE 云平台支持下的西天山森林遥感监测与时空变化分析[J].测绘通报,2020,(08):13-17. (Shao Yakui,Wang Lei,Zhu Changming,et al. Forest survey and spatio-temporal analysis in West Tianshan mountains supported by Google Earth Engine[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2020, (8):13-17.)

[2] Shao Y K, Feng Z K, Sun L H, Yang X H, Li Y D, Xu B, Chen Y. Mapping China's Forest Fire Risks with Machine Learning[J]. Forests,2022,13(6):856-876.

[3] Ying L, Han J, Du Y, Shen Z. Forest fire characteristics in China: Spatial patterns and determinants with thresholds[J]. Forest Ecology and Management,2018, 424:345-354.

[4] 冯德乾,王珊,赵义民,冯仲科. 中国森林资源变化趋势及龄组结构优化研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学):1-10. (Feng Deqian, Wang Shan, Zhao Yimin,et.al. Analysis of Structural Changes in China's Forest Resources and Age Group Optimization Model [J]. Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2023, 43(4).)

[5] 王铮,夏海斌,田园,王魁,花卉,耿文均,田丽,郑保利,赵金彩. 胡焕庸线存在性的大数据分析——中国人口分布特征的生态学及新经济地理学认识[J]. 生态学报,2019,39(14):5166-5177. (Wang Zheng,Xia Haibin,Tian Yuan,et al. A big-data analysis of HU Line existence in the ecology view and new economic geographical understanding based on population distribution [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14):5166-5177.)

[6] Adab H, Kanniah KD, Solaimani K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques[J]. Natural Hazards,2013, 65(3):1723-1743.

[7] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann‐Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology,2002,259(1):254-271.

[8] 段亚明,刘勇,刘秀华,王红蕾. 基于 POI 大数据的重庆主城区多中心识别[J]. 自然资源学报,2018,33(05):788-800.(Duan Yaming, Liu Yong, Liu Xiuhua,et al. Identification of

Polycentric Urban Structure of Central Chongqing Using Points of Interest Big Data [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 788-800.)
[9] Lefever D W. Measuring Geographic Concentration by Means of the Standard Deviational Ellipse[J]. American Journal of Sociology,1926,32(1):88-94.
[10] 李颉,郑步云,王劲峰. 2008—2018 年中国手足口病时空分异特征[J]. 地球信息科学报,2021,23(03):419-430.(Li Jie, Zheng Buyun, Wang Jinfeng,et al. Spatial-temporal heterogeneity of Hand, Foot and Mouth Disease in China from 2008 to 2018 [J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(3):419-430.)
[11] Yuan J, Bian Z, Yan Q, Gu Z Y, Yu H C. An Approach to the Temporal and Spatial Characteristics of Vegetation in the Growing Season in Western China[J]. Remote Sensing,2020,12(6):945-960.
[12] Shao Y, Feng Z, Cao M, Fahad S, Liu X, Wang Z. An Ensemble Model for Forest Fire Occurrence Mapping in China.Forests 2023, 14, 704.

作者贡献声明*：

冯仲科、邵亚奎：提出研究思路，设计研究方案；
邵亚奎、孙林豪、杨煊涵：进行实验；
马天天：采集、清洗和分析数据；
邵亚奎、孙林豪、马天天、杨煊涵：论文起草；
邵亚奎、冯仲科：论文最终版本修订。